

高压直流输电(High Voltage DC transmission)

组长：陈九林

小组成员：曹俊锋、陈路、胡益飞、陈瑞良、贵彬

21世纪中国能源和电力工业建设的基本战略：大力开发西部水电、火电资源，实施西电东送，同时实现电力南北互供、全国联网，以实现全国范围内的资源优化配置和能源优化供给。

以西电东送带动全国联网，实现各大区域电网和省域电网的相互连接，将打破由于地域能源资源分布和经济发展的不平衡，疏解资源瓶颈，提高能源运行效率。

中国是一个发展中国家，中国电网无论从总体规模和技术水平方面与发达国家相比，都有较大的差距。因此，为了中国大规模西电东送和全国联网工程的实施，必须研究电力系统的安全、稳定和经济性，并进而研究相应对策，防止在建成规模巨大的电力供应网络后发生大面积停电事故。

- ▶ 高压直流输电具有明显的优势。直流输电是电力系统中近年来迅速发展的一项新技术。将其与交流输电相互配合，构成了现代电力传输系统，并随着电力系统技术经济需求的不断增长和提高，直流输电受到广泛的注意并得到不断的发展。
- ▶ 与直流输电相关的技术，如电力电子、微电子、计算机控制、绝缘新材料、光纤、超导、仿真以及电力系统运行、控制和规划等的发展为直流输电开辟了广阔的应用前景。

- ▶ 国家电网公司表示，根据有关部门对2010年－2020年用电量预测和电源规划，以及对国家电网基本功能的要求，到2015年，我国可能形成覆盖华北、华中、华东地区的特高压交流同步电网，含蒙西、陕北、晋东南、淮南、徐州煤电基地及西南水电基地电力外送的特高压骨干电网（由1000kV级交流电网和800kV级直流系统构成）。

■ 据了解，目前世界上只有日本和俄罗斯两国拥有1000千伏特高压交流电网，且都是短距离输电。正负800千伏直流输电技术国际上尚无运行经验，关键技术和设备有待进一步研究开发。南方电网采用特高压输电技术，可以有效缓解长距离“西电东送”输电走廊资源紧张局面，提高电网安全稳定水平，输电能力也将明显提高。

※高压直流输电的发展历史，包括国外的发展概况以及我国高压直流输电的发展情况

※直流输电的基本原理

※直流输电系统的分类：单极线路方式；双极线路方式

※直流输电的优缺点

※交流输电与直流输电比较的等价距离

※直流输电的发展前景

1.1 高压直流输电概况

- ▶ 一、直流输电的发展
- ▶ 二、我国直流输电概况
- ▶ 三、直流输电技术的主要用途（类型）

▶ 一. 直流输电的发展

- ◆ 早期阶段（1930以前）直流输电→交流
- ◆ 研究阶段（1930～1950）：（因交流输电的缺点）研制了可控汞弧阀换流器，
- ◆ 重新兴起阶段（1954～1970）但受换流阀（容量和电压）的限制
- ◆ 迅速发展时期（1970～）：条件：可控硅换流器、电子技术、计算机技术
- ◆ 二十世纪90年代后，轻型直流输电（HVDC Light），采用脉宽调制（PWM）技术，应用绝缘栅双极晶体管（IGBT）组成的电压源换流器进行换流。主要应用于向孤立的远方小负荷区供电、小型水电站或风力发电站与主干电网的连接、小型背靠背换流站以及输送功率较小的配电网络。

二. 我国直流输电现况

●到2004年我国已投入的有：

➤葛洲坝—南桥 1989年投入 500kV双极 1200MW 1080km

➤天生桥—广州 1998年 500kV12脉波双极双桥 1800Mw 980km

➤三峡—常州 三峡—广东 贵州—广东 灵宝背靠背直流输电
舟山 嵊泗

●2006年12月19日开工，云南楚雄—广东 $\pm 800\text{kV}$ ，500万kW，1438km，2009年单极投产，2010年双极投产

●2007年5月21日，四川—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程在上海奠基。

●向家坝—四川—（途径重庆、湖南、湖北、安徽、浙江）上海奉贤，1600万kW，2000km，投资180亿，计划于2011年建成。

三.直流输电技术的主要用途

1、远距离大容量直流架空线路工程

直流输电在远距离大容量输电方面比交流输电有明显的优势。目前在已运行和正在建设的直流工程中，此类工程约占**1/3**，并且在今后它也具有较好的发展前景。此类工程大多是解决大型水电站或火电厂（煤炭基地的坑口电站）向远方负荷中心送电问题。比如

巴西的伊泰普为两回±**600kV**，约**800km**长，容量**6300MW**

加拿大的纳尔逊河两回±**500kV**，约**940km** **4000MW**

三峡——华东 三回±**500kV**，约**900~1100km** **7200MW**

三峡——广东 一回±**500kV** **960km** **3000MW**

2、背靠背直流联网工程

3、跨海峡直流海底电缆工程

- 英法海峡 $\pm 270\text{kV}$ 72km 2000MW
- 波罗底海（瑞典—德国）单极450kV 海底250km，架空12km 600MW
- 日本纪伊 $\pm 500\text{kV}$ 海底51km，架空51km 2800MW
- 巴坤（马来西亚）三回 $\pm 500\text{kV}$ ，海底670km，架空660km 2130MW
- 舟山 嵊泗

4、向大城市送电的直流地下电缆工程

5、向孤立负荷点送电或从孤立电站向电网送电的直流工程

6、与交流输电并联的直流输电工程

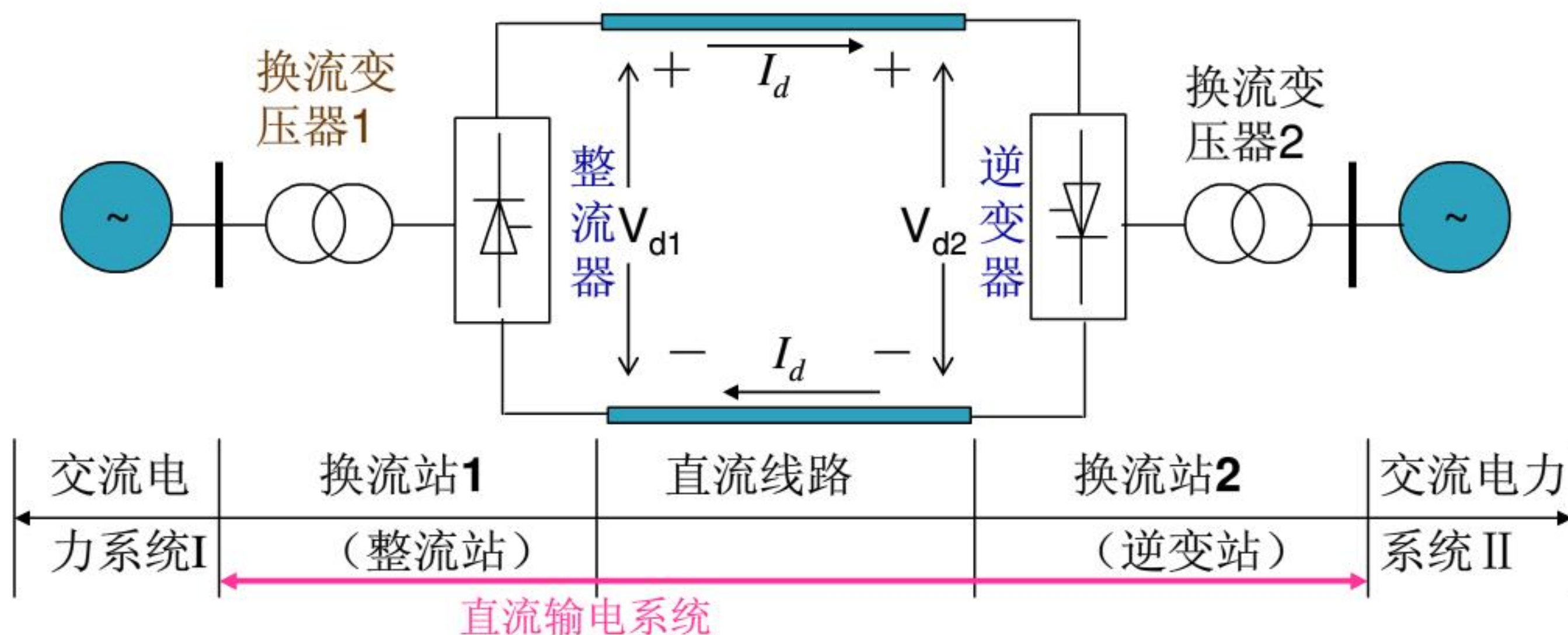
1.2 直流输电系统的构成

► 一.直流输电的基本概念

直流输电是将发电厂发出的交流电经过升压变压器后，又换流设备（整流器）整成直流，通过直流线路送到受端，再经换流设备（逆变器）换成交流供给交流系统。

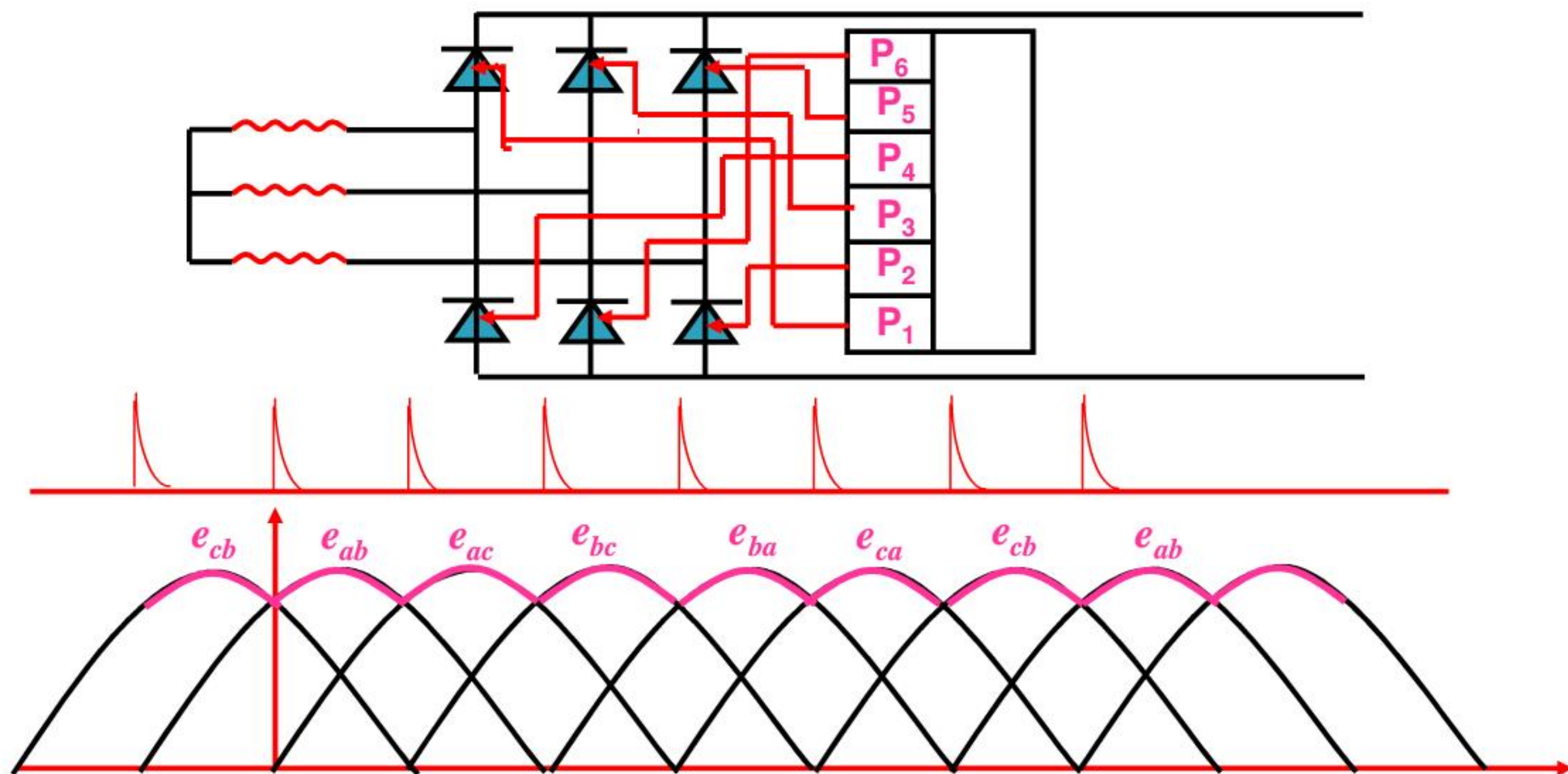
按它与交流系统连接的节点数可分为 $\left\{ \begin{array}{l} \text{两端} \\ \text{多端} \end{array} \right.$

直流输电系统的构成



工作原理：有交流电力系统I送出交流功率给整流站的交流母线，经换流变压器1，送到整流器，把交流功率转换成直流功率，然后由直流线路把直流功率输送给逆变站内的逆变器，逆变器将直流功率转换成交流功率，再经换流变压器2送入受端的交流电力系统II。

直流输电系统接线示意图



二、两端直流输电系统

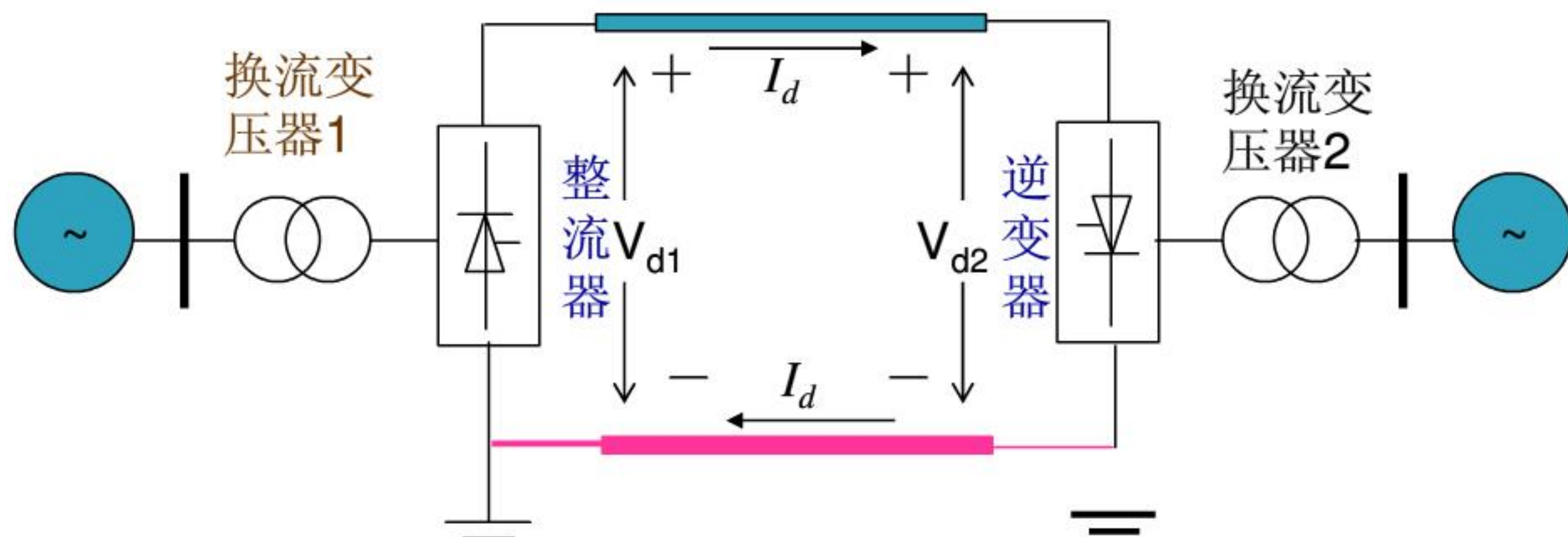
指具有一个整流站和一个逆变站的输电系统

构成 { 单极
双极
无直流输电线路（也叫两侧换流器 背靠背地装设在一起

1、单极系统的构成方式

换流站出线端对地电位为正的称为正极，与之相连的导线称为正极导线，对地电位为负的称为负极。一般采用正极接地，采用一根负极性的导线，而由大地或水提供回路。

单极系统以负极运行优点：线路受雷击的几率及电晕引起的无线干扰比正极运行时小。

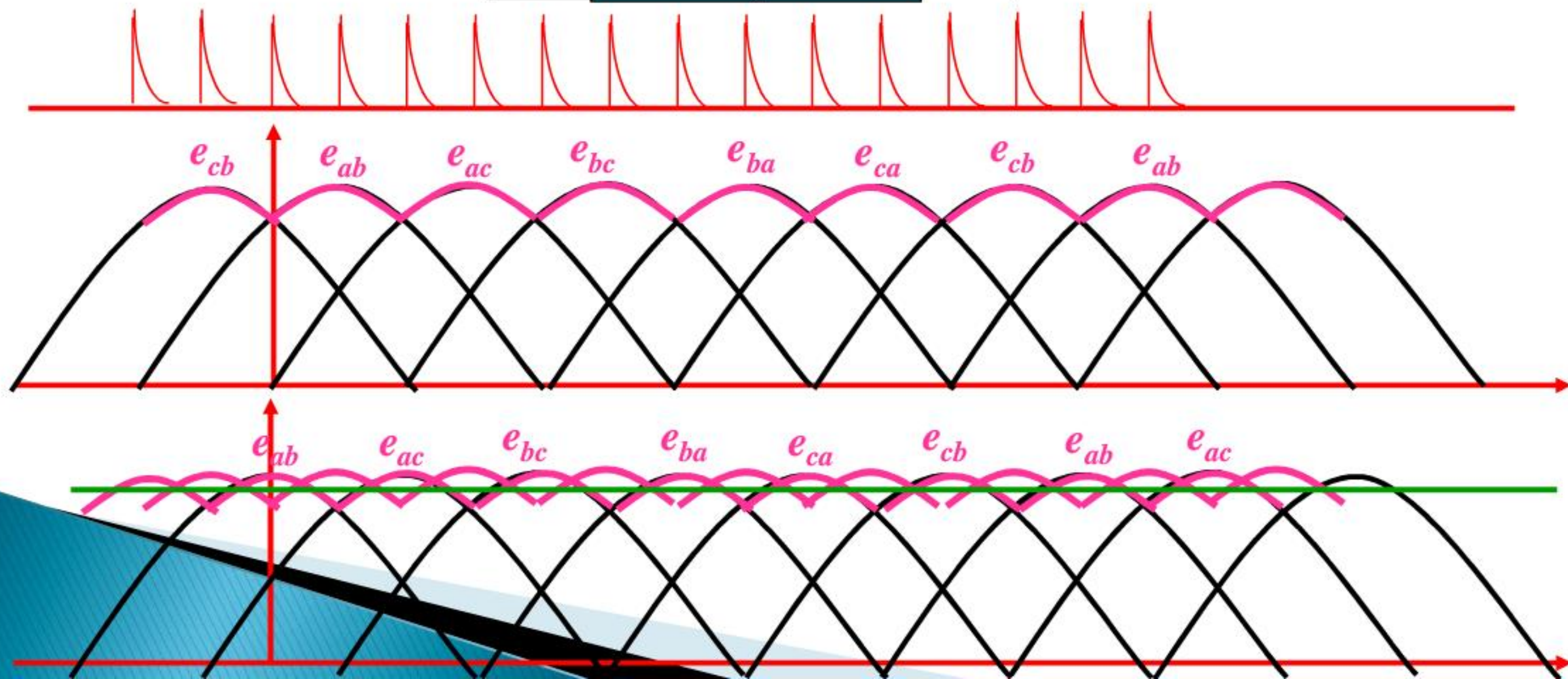
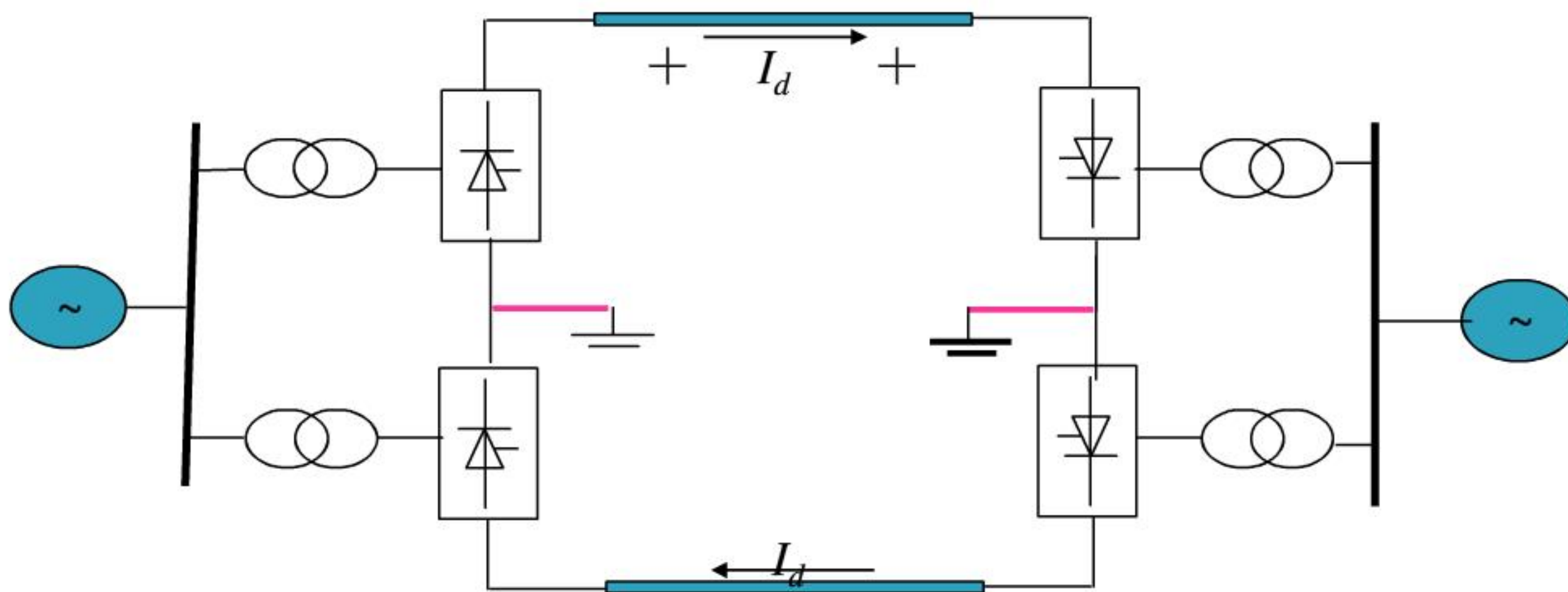


大地（海水）回流方式（一线一地制）/导线回流方式（两线制）

优点：线路投资较省，且是建立双极系统的第一步

2、双极系统的构成方式

有两根导线，一正一负，每端有两个为额定电压的换流器串联在直流侧，两个换流器间的连接点接地。正常时两极电流相等，无接地电流，两极可独立运行。若因一条线路故障而导致一极隔离，另一极可通过大地运行，能承担一半的额定负荷，或利用换流器及线路的过载能力，承担更多的负荷。



1.3 HVDC运行特性及其与交流输电的比较

因素 {

- (1) 可靠性
- (2) 技术性能
- (3) 经济性

一、技术性能

(一) HVDC运行特性

1、功率传输性

(1) 对于交流：在一定输电电压下，交流输电线路容许输送功率受网络结构和参数的限制。 L 越长， x_{Σ} 越大，输送的功率越小；而远距离需输送大功率。

解决办法:

- ▶ 首先采用:强行励磁, 送端切除一部分发电机, 快速切除故障, 自动重合闸 (投资相对较少)
- 其次:
 - ☺ 串连电容补偿 (减小 x_{Σ} , 但易引起振荡)
 - ☺ 增设开关站
 - ☺ 电气制动或增加线路回路数
 - ☺ 提高输电电压 (增加绝缘投资)

(2) 对于直流

直流输电无相位和功角, 不存在稳定问题, 只要电压降和网损符合要求即可。

结论: 直流不存在两端交流系统之间同步运行稳定性问题, 可提高交流系统的稳定性

2.线路故障时的自防护能力

➤交流：如单相接地（频率最高），其消除过程约为**0.4~0.8s**，加重合闸时间，约为**0.6~1s**恢复，如为永久性，则三相跳闸。

➤直流：如单相接地（频率最高），换流器晶闸管立即闭锁，电压降为**0**，从而 I_d 降为**0**，不存在不过**0**，因此恢复时间约为**0.2~0.35s**，如为永久性故障，可延长留待去游离时间和降压方式，进行**2~3**次启动

结论：直流响应快，恢复时间短，不受稳定制约，可多次启动和降压运行。

3、过负荷能力

➤交流具有较高的持续运行能力。

➤直流受换流站发热限制

结论:

✓交流更灵活

✓直流要有更大的过负荷能力，在选换流器时需考虑，但这将增加投资，利用率低。

4、潮流和功率控制:

➤交流输电取决于网络参数、发电机与负荷的运行方式，值班人员需要进行调度，主要是改变输入到发电机的轴功率从而改变功角，但转子的机械惯性，速度慢，又难于控制。

➤直流输电线路的电流和功率调节受控制系统的电子装置改变可控硅的触发角相位而实现，响应快，可全部自动控制

5、短路容量

➤两个系统以交流互联时，将增加两侧系统的短路容量，有时会造成部分原有断路器不能满足遮断容量要求而需要更换设备。

➤直流互联时，不论在哪里发生故障，在直流线路上增加的电流都是不大的，因此不增加交流系统断路器容量


6、调度管理

通过直流线路互联的两端交流系统可以有各自的频率，输送功率也可以保持恒定（恒功率、恒电流等）。对送端而言，整流站相当于交流系统的一个负荷，对受端而言，逆变站则相当于交流系统的一个电源，互相之间的干扰和影响小，运行管理简单方便。

7、线路走廊

按同电压**500kv**考虑，**1条500kv**直流输电线路的走廊约**40m**，**1条500kv**交流输电线路的走廊约**50m**，但是**1条**同电压的直流输电线路输送容量约为交流线路的**2倍**，输送效率约为交流线路的**2倍**甚至更多。

(二) 限制直流输电的因素

- 1、直流断路器的费用高**
 - 2、不能用变压器改变电压等级**
 - 3、换流设备费用高**
 - 4、产生谐波，需交流和直流滤波**
 - 5、控制复杂**
- 

一、可靠性

- 强迫停运率：直流线路强迫停运率低，但两端变电站（换流站）高
- 电能不可用率：直流线路电能不可用率低，但两端变电站（换流站）高

总的来说从可靠性和可用率两个指标来看，两种方式相当，都是可行的。

三、经济性和等价距离

1、直流与交流架空线路的投资

- 三相交流线路一般需**3**根导线；
- 直流输电一般采用双极中性点接地，线路需**2**根

假设导线截面积相等，电流密度相等，绝缘水平相同进行分析

$$I_d = I_a \quad U_d = \sqrt{2}U_a$$

$$P_d = 2U_d I_d \quad P_a = 3U_a I_a \cos\varphi$$

结论:

- 同样截面积和绝缘水平下，**2**根直流线路的 P_d 和**3**根交流线路所传送的 P_a 几乎相等；
- 相同距离，有色金属、绝缘子、金具等节约三分之一；
- 减少走廊宽度，节约土地。
- 线路投资约为交流的**60%~70%**

2、电缆线路投资比较

电缆绝缘在直流电压和交流电压作用下的电位分布与击穿机理不相同。电缆绝缘用直流的容许工作电压比交流高**2**倍。

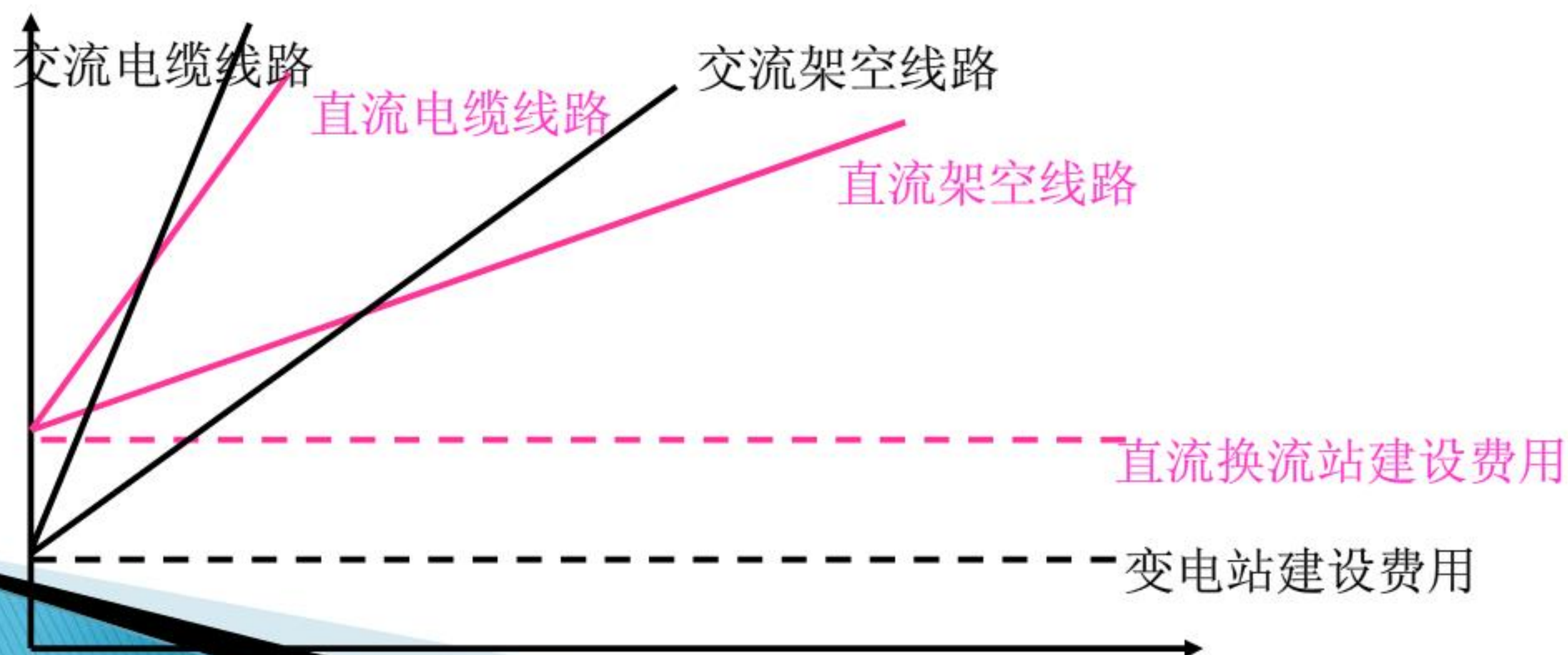
直流造价 << 交流

3、直流换流站与交流变电站投资比较

换流站设备复杂：换流变压器、可控硅整流器、换流器的控制调节装置、滤波装置、平波电抗器及其它

4、直流与交流的等价距离

等价距离：在某一距离下，两者总费用相等



谢谢！